

土地利用方式对黑土剖面有机碳分布及碳储量的影响*

郝翔翔^{1,2} 韩晓增^{1**} 李禄军¹ 邹文秀¹ 陆欣春¹ 乔云发¹

(¹中国科学院东北地理与农业生态研究所海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站, 哈尔滨 150081; ²中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 以典型黑土区 29 年长期定位试验处理下的土壤为对象,研究了农田、裸地、自然草地和落叶松林地 4 种土地利用方式下土壤剖面(0~200 cm)有机碳及碳储量的分布特征.结果表明:不同土地利用方式下表层(0~10 cm)土壤有机碳含量差异最大,表现为草地>农田>林地>裸地.农田 10~120 cm 各土层有机碳含量均低于草地、林地和裸地.与农田相比,自然草地对土壤有机碳提升作用明显,其 0~60 cm 各层土壤有机碳含量均显著高于农田;裸地表层(0~10 cm)土壤有机碳含量显著低于农田;落叶松林地 0~20 cm 有机碳含量与农田相比无明显变化,但其 20~140 cm 土层有机碳含量均高于农田.土壤剖面有机碳含量与 pH 值、容重、粉粒和粘粒含量呈显著负相关,与全氮和砂粒含量呈显著正相关.农田 0~200 cm 剖面有机碳储量显著低于其他 3 种利用方式,分别比草地、裸地和林地低 13.6%、11.4%和 10.9%.农田黑土在增加碳储量及改善环境方面具有很大潜力.

关键词 黑土; 植被类型; 土壤剖面; 土壤有机碳; 碳储量

文章编号 1001-9332(2015)04-0965-08 **中图分类号** S153.6 **文献标识码** A

Profile distribution and storage of soil organic carbon in a black soil as affected by land use types. HAO Xiang-xiang^{1,2}, HAN Xiao-zeng¹, LI Lu-jun¹, ZOU Wen-xiu¹, LU Xin-chun¹, QIAO Yun-fa¹ (¹*National Field Research Station of Agro-ecosystem in Hailun, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China*; ²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, **26**(4): 965-972.

Abstract: Taking soils in a long-term experimental field over 29 years with different land uses types, including arable land, bare land, grassland and larch forest land as test materials, the distribution and storage of soil organic carbon (SOC) in the profile (0-200 cm) in typical black soil (Mollisol) region of China were investigated. The results showed that the most significant differences in SOC content occurred in the 0-10 cm surface soil layer among all soils with the order of grassland>arable land>larch forest land>bare land. SOC contents at 10-120 cm depth were lower in arable land as compared with the other land use types. Compared with arable land, grassland could improve SOC content obviously. SOC content down to a depth of 60 cm in grassland was significantly higher than that in arable land. The content of SOC at 0-10 cm in bare land was significantly lower than that in arable land. Although there were no significant differences in SOC content at 0-20 cm depth between larch forestland and arable land, the SOC contents at 20-140 cm depth were generally higher in larch forestland than that in arable land. In general, SOC content showed a significantly negative relationship with soil pH, bulk density, silt and clay content and an even stronger significantly positive relationship with soil total N content and sand content. The SOC storage in arable land at 0-200 cm depth was significantly lower than that in the other three land use types, which was 13.6%, 11.4% and 10.9% lower than in grassland, bare land and larch forest land, respectively. Therefore, the arable land of black soil has a great potential for sequestering C in soil and improving environmental quality.

Key words: black soil; vegetation type; soil profile; soil organic carbon; carbon storage.

* 公益性行业(农业)科研专项(201303126,201203030,201303011-1)资助.

** 通讯作者. E-mail: xzhan@neigae.hrb.ac.cn

2014-06-04 收稿,2015-01-07 接受.

土壤有机质 (SOM) 不仅是土壤具有结构性和生物性的基本物质^[1], 而且 SOM 作为表层陆地生态系统最大的碳库, 在全球碳循环中起着至关重要的作用, 其微小变化将引起大气 CO₂ 浓度的较大波动, 进而影响全球气候变化. 对陆地生态系统碳储量的估算一般限定在 100 cm 土层内, 然而有研究指出, 当以 200 cm 土体作为计算范围时, 全球土壤有机碳 (SOC) 储量会提高 60%^[2].

在同一气候和地理条件下, 土地利用方式是影响 SOC 含量的主要因素^[3]. 国内外很多学者研究了土地利用方式的改变对 SOC 含量的影响, 其研究热点主要集中在自然植被 (森林和草地) 转变为农田^[4-5], 或农田恢复为自然植被^[6-7] 后 SOC 的变化规律. 然而, 大部分研究中不同利用方式下的土壤相距较远^[8], 其原始属性有所差异, 且部分土地利用方式改变后会对土壤产生较大扰动^[9], 如森林转变为农田后, 在清除根系过程中, 势必会将下层与表层土壤进行混合, 这就降低了土地利用方式变更前后土壤性质之间的可比性. 在小尺度同一地理位置下, 以原始属性完全一致的土壤作为研究对象的报道相对较少^[10], 且以往土地利用方式对 SOC 含量及储量影响的研究大部分集中在有机碳含量较高的表层, 或者土壤剖面中的 A 层^[3], 对不同利用方式下 0~200 cm 土壤剖面中 SOC 的垂直分布特征以及各固定层中碳储量的研究鲜有报道.

东北黑土由第四纪黄土状母质发育而成, 土体较厚, 受草甸草本植物根系活动的影响, 黑土有机质可垂直分布到土壤剖面的深层. 本研究区域黑土 200 cm 以下土层的有机质含量仍可达到 5.0 g · kg⁻¹ 左右, 且其地下水埋藏较深, 一般情况下地下水和地表水无交流, 多年观测大气降水在 0~170 cm 土体中进行运移^[11], 由表层 SOM 分解和矿化产生的溶解态有机质会随水分的运移而进入下层土体^[12]. 此外, 黑土粘粒含量较高, 有机质含量的多少直接决定其通气性、透水性和热传导性等物理性质. 因此, 深入研究不同土地利用方式下 SOC 在黑土剖面的分布特征对提高黑土有机碳储藏能力以及估算区域土壤固碳潜力具有重要意义. 本研究以我国黑土带中心区域为研究地点, 以同一地理位置相毗邻的农田、草地、林地和裸地土壤为研究对象, 分析 4 种利用方式下 0~200 cm 土体内 SOC 的含量、分布和储量差异, 探讨土地利用方式的转变对黑土有机碳库的影响, 以期估算区域土壤固碳潜力和优化土地利用方式提供理论依据.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于黑龙江省海伦市中国科学院海伦国家野外科学观测研究站 (47°26' N, 126°38' E), 地处我国东北黑土带的中心区域. 该区属于温带大陆性季风气候, 年均气温 1.5 °C, 年降水量 500~600 mm, 年有效积温 (≥10 °C) 2450~2500 °C, 年日照时数 2600~2800 h, 土壤为第四纪黄土状亚粘土发育而成的中厚黑土. 研究区内黑土开垦年限在 100 年以上, 开垦之前为自然草原化草甸植被, 开垦后的前 60 年不施肥, 之后的 20 年施用农家肥, 试验开始前的最后 20 年施用化学氮肥.

1.2 试验设计

试验区大小为 500 m×150 m, 土地平坦, 土壤基础肥力相对均匀. 1985 年在试验区设立 4 种土地利用方式 (图 1), 分别为: 草地 (grassland), 自然恢复, 目前已恢复为黑土区典型草原化草甸植被; 裸地 (bare land), 退耕休闲, 且每年在植物生长初期定期将植物铲除, 始终保持无植被覆盖; 农田 (arable land), 不施用任何肥料, 种植方式为小麦-玉米-大豆轮作 (2013 年种植大豆), 一年一熟制, 采用传统耕作方式, 作物生长季进行 4~6 次耕作, 耕作深度为 20 cm, 秋季收获后作物地上部全部移除; 林地 (forestland), 属人工落叶松林, 在耕地上直接种植落叶松, 林分密度为 2100 株 · hm⁻², 株高约 4.5 m.

1.3 土壤样品采集与分析

2013 年 6 月, 每种利用类型采集 3 个土壤剖面 (图 1), 做为 3 次重复. 土壤剖面深 200 cm, 分 11 层 (0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160、160~180 和 180~200 cm)

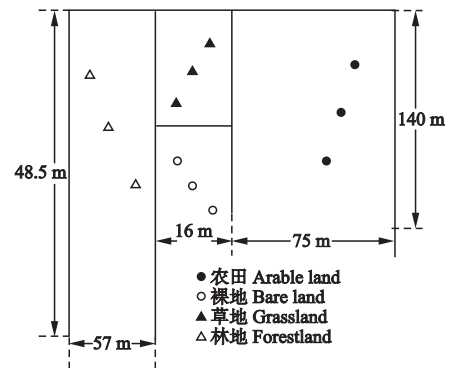


图 1 不同土地利用方式下土壤剖面样品分布
Fig.1 Distribution of soil profile samples under different land uses.

采样,其中,草地和林地采集样品时清除表面枯枝落叶层及其分解和半分解层,起始层为矿质土层.每层取土样约 1 kg,并用环刀法测定各土层土壤容重.

各土层土壤全碳、全氮采用元素分析仪(EA3000, Euro Vector, Italy)测定.因本研究中黑土不含碳酸盐,所以全碳与有机碳含量一致.土壤 pH 值采用电位法(水土比 2.5:1),机械组成采用吸管法测定^[13].

1.4 数据处理与土壤有机碳储量计算

文中数据采用 SPSS 15.0 和 Microsoft Office Excel 2007 软件进行数据处理和制图,不同处理以及剖面不同层次之间数据的差异显著性采用 Duncan 法(新复极差法)进行比较,相关性分析用 Pearson 相关分析.

土壤有机碳储量采用分层法计算,具体公式为:

$$SOC_s = \sum_{i=1}^n C_i \rho_i T_i (1 - \theta_i) \times 10^{-1}$$

式中: SOC_s 为特定深度的土壤有机碳储量 ($t \cdot hm^{-2}$); C_i 为第 i 层土壤的有机碳含量 ($g \cdot kg^{-1}$); ρ_i 为第 i 层土壤容重 ($g \cdot cm^{-3}$); T_i 为第 i 层土壤厚度 (cm); θ_i 为第 i 层 > 2 mm 砾石含量 (体积 %); n 为参与计算的土壤层次总数.黑土中 > 2 mm 砾石含量极少,忽略不计.

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤有机碳含量的剖面分布

研究区不同土地利用方式下的土壤 SOC 含量均随剖面深度的增加呈逐渐降低趋势.方差分析表明,从表层往下到某一特定层次,各层之间的 SOC 含量差异显著(表 1),而这一特定层再往下,各层之间的 SOC 含量无显著差异,本文将这一特定层称之为“SOC 变异临界层”.农田 SOC 变异临界层位于 100 cm 处,裸地位于 120 cm 处,草地和林地均位于 140 cm 处.不同利用方式下 SOC 变异临界层存在差异,说明土地利用方式改变了 SOC 在土体中的分布,与农田相比,草地和林地加大了 SOC 在剖面中的分异.

不同利用方式下 SOC 含量以 0~10 cm 土层的差异最大,草地、农田、林地和裸地相互之间差异显著,表现为草地>农田>林地>裸地.10~60 cm 各土层 SOC 含量均以草地最高,林地和裸地其次,农田最低,且草地显著高于农田.与农田相比,无植被生长的裸地仅表层 0~10 cm SOC 含量显著降低,20~

表 1 不同土地利用方式下土壤有机碳的剖面分布
Table 1 Vertical distribution of soil organic carbon in the soil profiles under different land uses ($g \cdot kg^{-1}$)

土壤深度 Soil depth (cm)	农田 Arable land	裸地 Bare land	草地 Grassland	林地 Forestland
0~10	32.43±1.19bA	30.37±0.22cA	38.85±0.47aA	32.29±0.20bA
10~20	29.68±2.07bB	31.15±0.86abA	32.56±0.83aB	31.16±0.79abA
20~40	17.92±2.51bC	23.70±2.29aB	24.96±0.82aC	22.07±0.98aB
40~60	13.09±1.17bD	15.38±1.18aC	15.46±0.52aD	14.74±1.05abC
60~80	10.25±0.79bE	11.64±1.26abD	11.73±0.55abE	12.16±0.53aD
80~100	7.92±0.76bF	8.83±0.70abE	9.34±0.06aF	9.58±0.82aE
100~120	5.50±0.58bG	6.96±0.27abF	7.41±0.10aG	6.91±1.51abF
120~140	4.06±0.24bG	4.33±0.43abG	4.65±0.27abH	5.52±1.31aF
140~160	3.38±0.06bcG	3.80±0.32aG	3.68±0.09abF	3.32±0.16cG
160~180	3.97±0.41aG	3.56±0.12abG	3.40±0.12abF	2.95±0.09bG
180~200	3.60±0.40aG	3.41±0.04aG	3.49±0.07aF	3.51±0.03aG

同行不同小写字母和同列不同大写字母表示差异显著 ($P<0.05$)
Different letters in a row followed by lowercase and in a column by capital letters meant significantly different at 0.05 level.

40 和 40~60 cm SOC 含量甚至显著高于农田,反映了休闲状态下植被退化会导致表层黑土 SOC 含量降低;草地显著提高了 0~60 以及 80~120 cm 土层 SOC 含量;林地则对 20~140 cm 土体 SOC 含量的增加有积极作用,其 20~40、60~80、80~100 和 120~140 cm 土层 SOC 含量显著高于农田.

2.2 土壤剖面中有机碳含量与土壤理化性质的相关性

随着剖面深度的增加,土壤的容重值 ($1.02 \sim 1.67 g \cdot cm^{-3}$) 逐渐增大(图 2),其中,农田 10~20 cm 土层容重明显高于其他利用方式,这可能与耕作过程中的机械压实有关.4 种利用方式下 200 cm 土体内的土壤 pH 值均呈现为弱酸性 ($5.90 \sim 6.86$),且随深度的增加呈升高趋势,其平均值表现为草地 (6.62)>农田 (6.35)>裸地 (6.31)>林地 (6.26).剖面中全氮含量的分布规律与有机碳一致,均随深度的增加呈明显降低趋势.4 种利用方式下土壤剖面中砂粒、粉粒和粘粒含量的平均值分别为 29.1%、33.7%和 37.2%,其中,砂粒含量在 0~100 cm 土体内随深度的增加呈降低趋势,100 cm 以下则趋于一致.

除 pH 值外,农田 SOC 含量与其他 5 种理化指标均显著相关,裸地、草地和林地则与除粘粒外的理化指标显著相关(表 2).当把 4 种利用方式下土壤剖面的 SOC 含量与理化性质整合到一起进行相关分析时,SOC 含量与以上 6 种理化指标均存在极显著的相关关系 ($P<0.01$),其中,与 pH 值、容重、粉粒和粘粒含量呈负相关,与全氮和砂粒含量呈正相关.

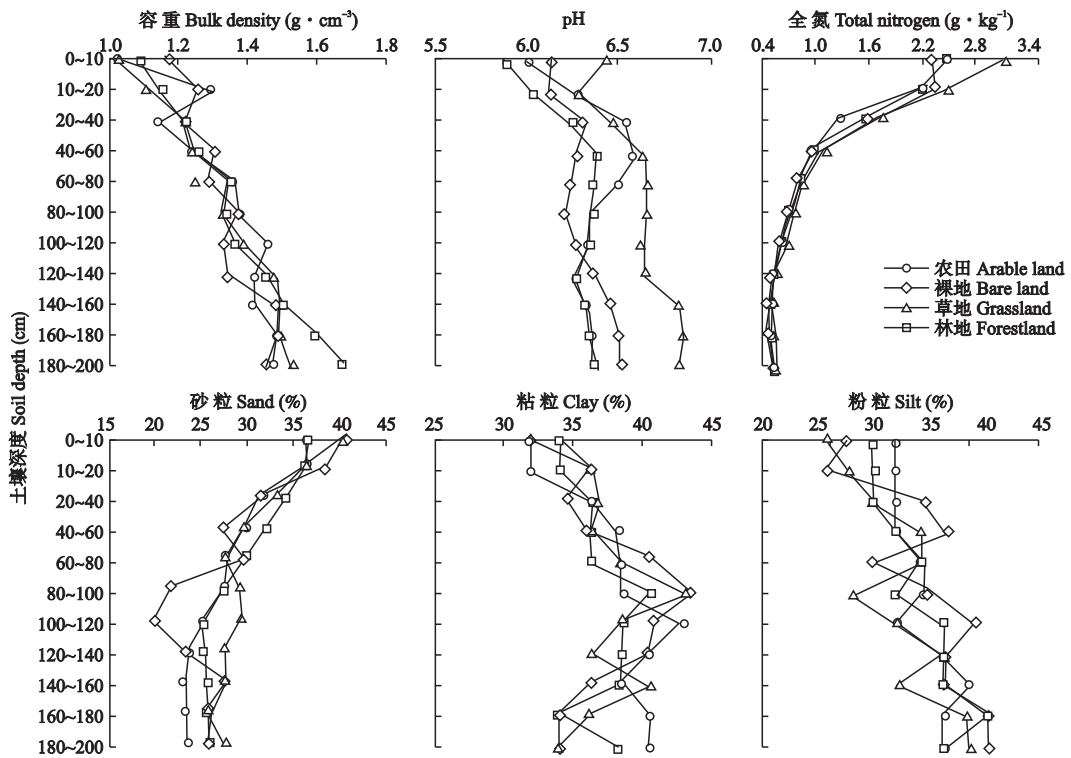


图2 不同土地利用方式下土壤剖面各层次理化性质
Fig.2 Soil physical and chemical properties at each depth of soil profiles under different land uses.

表2 土壤有机碳含量与土壤理化性质的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between soil organic carbon content and soil properties

土地利用方式 Land use	pH	容重 Bulk density	全氮 Total nitrogen	砂粒 Sand content	粉粒 Silt content	粘粒 Clay content
农田 Arable land	-0.357	-0.847 **	0.993 **	0.983 **	-0.710 *	-0.937 **
裸地 Bare land	-0.784 **	-0.873 **	0.993 **	0.873 **	-0.838 **	-0.392
草地 Grassland	-0.911 **	-0.945 **	0.991 **	0.751 **	-0.662 *	-0.344
林地 Forestland	-0.850 **	-0.900 **	0.990 **	0.974 **	-0.872 **	-0.602
4 种利用方式 All of the four land use types	-0.506 **	-0.881 **	0.991 **	0.861 **	-0.732 **	-0.548 **

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

2.3 不同土地利用方式下土壤有机碳储量的剖面分布

由图 3 可见,农田不利于土壤剖面中有机碳的积累,其 0~120 cm 各土层中的有机碳储量普遍低于其他 3 种利用方式,其中,0~20 cm 有机碳储量显著低于草地;20~60 cm 显著低于草地和裸地,60~100 cm 显著低于林地.值得注意的是,与其他利用方式相比,无植被生长的裸地土壤剖面各层有机碳储量并未出现显著的降低趋势,其 20~40 和 40~60 cm 土层中的有机碳储量甚至显著高于农田.与农田相比,休闲处理下的草地和裸地不仅有利于表层(0~20 cm)土壤有机碳储量的稳定,而且对亚表层(20~40 cm)及其下层(40~60 cm)土体中有机碳储

量的增加有显著作用;林地有利于 60~100 cm 土壤有机碳储量的增加.

对土壤剖面各土层的有机碳储量进行加和可得出特定厚度土层的有机碳储量(表 3).0~100 和 100~200 cm 土层中的有机碳储量平均分别占整个 200 cm 土层的 77.4%和 22.6%.不同利用方式下 0~100 cm 土层有机碳储量规律为草地>裸地>林地>农田,且农田显著低于其他 3 种利用方式;100~200 cm 土层有机碳储量表现为草地>林地>裸地>农田,但 4 种利用方式相互之间无显著差异;农田 0~200 cm 土层的有机碳储量显著低于其他 3 种利用方式,分别比草地、裸地和林地低 13.6%、11.4%和 10.9%.

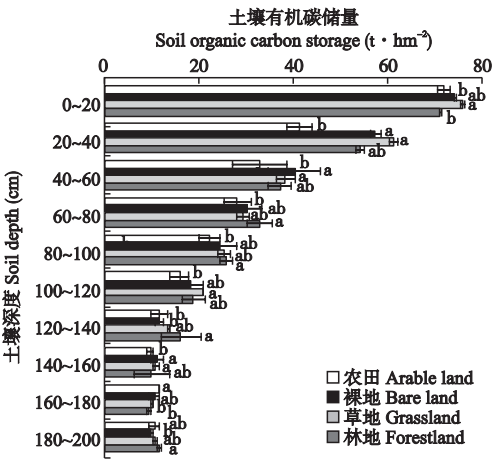


图3 不同土地利用方式下土壤剖面各层次中的有机碳储量

Fig.3 Soil organic carbon storage at each depth of soil profiles under different land uses

不同字母表示同一土层不同利用方式之间差异显著 ($P<0.05$) Different letters meant significant difference among different land uses in the same soil layer at 0.05 level.

表3 不同利用方式下土壤不同层次及整个剖面有机碳储量

Table 3 Soil organic carbon storage at different layers and the entire soil profiles under different land uses ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)

土层 Soil layer (cm)	农田 Arable land	裸地 Bare land	草地 Grassland	林地 Forestland
0~100	194.70±13.68b	225.10±11.58a	228.20±3.53a	219.50±1.88a
100~200	59.59±2.10a	61.85±2.31a	66.13±1.46a	65.89±7.02a
0~200	254.30±14.78b	286.90±10.07a	294.30±4.90a	285.40±8.38a

同行小写字母不同表示同一土层不同利用方式间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in a row mean significant difference among different land uses in the same soil layer at 0.05 level.

3 讨 论

3.1 土地利用方式对土壤有机碳剖面分布的影响

土地利用方式是影响 SOC 含量变化的主要人为因素之一,由土地利用方式变更而引起的植被类型发生改变后,表层 SOM 向下层土体运移的数量和性质也随之发生改变,进而影响 SOC 在剖面中的分布^[14].有研究证实,土地利用方式对土壤剖面中 SOC 的影响随深度的增加而降低^[15].在本研究中,不同利用方式对黑土剖面中有机碳的影响范围已经达到 100 cm 以下,说明土地利用方式的改变对黑土 SOC 具有重要影响.

黑土 SOC 的损失主要是在开垦之后的 0~50 年间,50~200 年内,有机碳含量以非常缓慢的速度下降或基本上维持在同一水平而不再下降^[16-17].本研究中的黑土开垦年限在 100 年以上,按照以往的研究

结论,本文农田处理自试验设立(1985 年)至今, SOC 含量应处于缓慢下降或稳定期,前期对该农田肥力变化的研究表明,1985、2001 和 2004 年该农田 0~20 cm 的 SOC 含量分别为 33.3、31.5 和 30.7 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[18],本文 0~20 cm 农田 SOC 含量平均值为 31.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,由此可见,该农田 0~20 cm SOC 含量自 1985 年以来较稳定,而本研究中的草地、林地和裸地均由农田转换而成,因此以农田作为对照进行对比分析可以较科学地反映土地利用方式对 SOC 含量的影响.

农田 0~140 cm 各土层 SOC 含量均低于草地或林地相应土层,一方面说明农田不利于土壤剖面中 SOC 的固定,另一方面说明土地利用方式对剖面中 SOC 含量的影响可达 100 cm 以下.梁爱珍等^[19]研究发现,自然黑土开垦后,0~5、5~10、10~20、20~30、30~40 和 40~100 cm 土层 SOC 含量分别降低了 46.6%、26.8%、20.1%、11.2%、13.7%和 15.0%,主要原因是农田凋落物输入减少、作物根系较浅、生物量较低,难以向土壤中输入足够的有机物质,尤其是深层土壤中作物的根系更少^[20];另外,耕作措施会破坏土壤团聚结构,导致受其物理保护的有机质暴露,从而提高 SOM 分解速度^[21].农田转化为自然植被的过程是一个 SOC 的累积过程,其累积速度与气候条件的相关性很强,在湿润地区 SOC 的累积相对较快^[22].本研究所在的黑土区尽管夏季短促,但其全年降水量的 89%~90%集中在 7—8 月,雨热同季,自然条件下,草原化草甸植被丰富,每年都会产生大量的地上凋落物及根系分泌物,为 SOC 提供了丰富的来源,其 0~60 cm 各土层 SOC 含量均高于农田、林地和裸地,尤其以表层 0~10 cm SOC 积累程度最高,显著高于以上 3 种利用方式.经过相同时间的植被退化过程(裸地)后,由于土壤长期缺乏有机物的输入,表层 SOM 加速分解,其含量显著降低,但值得注意的是,裸地表层以下 SOC 含量与农田相比并未降低,说明在无水土流失和耕作干扰的前提下,黑土 10 cm 以下 SOC 含量与农田相比不会降低.张兴义等^[23]研究认为,目前黑土 SOC 含量相对稳定,预计未来 SOC 含量下降主要发生在水土流失比较严重的区域.

一些研究证实,农田造林后表层 SOC 含量将显著提高^[24],因为造林后会持久性地产生大量地上生物量,进而改善了凋落物的数量和性质,而且耕作措施的消除能有效防止 SOM 的分解.但也有研究指出,农田造林后土壤 SOC 含量无显著变化^[25],有些

研究甚至得出相反结论,造林后 SOC 有所降低^[26].产生以上差异的原因可能与气候和土壤条件、林地类型、土地利用变化后的时间、及研究方法等因素有关^[27].Laganiere 等^[7]总结了 33 个不同区域造林对 SOC 影响的研究结果,发现阔叶类林地对 SOC 的积累程度明显强于针叶类,以松树类植被对农田实施造林后,土壤剖面中的 SOC 含量无明显变化.本研究表明,黑土由农田转变为落叶松林地后,0~10 和 10~20 cm SOC 含量无明显变化.一方面是由于落叶松林每年凋落物量有限,而且分解缓慢的枯落物主要积聚地表^[28],另一方面是由于落叶松林地土壤 pH 值较低(图 2),酸度大,不利于黑土区草原化草甸植被的生长,归还到土壤中的有机物料数量较少.林地根系较深而且生长繁茂,可通过死亡、脱落、分泌等代谢活动为深层土壤提供 SOC 来源,因此尽管个别土层差异不显著,但林地 20~140 cm 各土层 SOC 含量普遍高于农田.

3.2 剖面土壤理化性质对土壤有机碳的影响

在同一气候和土壤条件下,土壤有机质的输入量在很大程度上取决于植被类型、土壤水分状况与养分有效性及人为扰动等因素,而有机物质的分解速率则与有机物质的化学性质、土壤水热状况以及物理化学等因素密切相关.4 种利用方式下土壤剖面 SOC 含量与全氮呈显著正相关,与容重呈显著负相关^[29].对 SOC 的稳定和转化机制而言,其影响因素以及各因素的影响机制和相对重要性会随土壤深度和土地利用方式的不同而不同^[30].从 SOC 含量与 pH 值的相关性来看,裸地、草地和林地的 SOC 含量与 pH 值均呈极显著负相关,但农田 SOC 含量与 pH 值之间则无显著关系,可能是由于农田中作物轮作和耕作措施所产生的干扰所致.由于粉粒对土壤水分有效性、植被生长的正效应及粘粒对土壤有机质的保护作用,在水平尺度的研究中,SOC 含量一般与粉粒和粘粒含量极显著正相关^[31].但本文从垂直角度的研究得出了相反结论,这一现象是土壤剖面长期成土演化的必然结果,由于长期的淋溶淀积作用,剖面顶部粘粒不断向下运移,导致上层土壤粘粒含量最低(图 2),向下逐渐增高,上层砂粒含量则相对最高,向下逐渐降低,再向下,随着淋溶的减弱,砂粒和粉粒含量基本稳定,而土壤剖面越向下,有机碳来源越少,成土时间不断增加导致的有机碳分解损失量增加,有机碳含量不断降低,最终表现为剖面中有机碳含量与粉粒及粘粒含量呈显著负相关、与砂粒含量呈显著正相关^[32].

3.3 不同土地利用方式下土壤有机碳储量变化

以往对 SOC 储量的估算一般限定在 100 cm 土体内.本文结果表明,当计算范围为 200 cm 时,黑土有机碳密度比以 100 cm 为界限时高出 29.2%,其 100~200 cm 的有机碳密度值($63.37 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)与表层 0~20 cm($72.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)接近.因此,黑土 100 cm 以下土体中的有机碳储量不容忽视,它有望成为提高土壤碳汇的重要潜力.

土地利用方式的改变会对土壤碳储量产生重要影响.Guo 等^[27]对全球 74 篇有关土地利用方式改变对土壤碳储量影响的研究进行总结,发现农田转变为草地和林地后,土壤碳储量分别提高了 19% 和 18%,而且,土地利用方式对 SOC 储量的影响在表层尤为明显^[33],因为残枝落叶分解后输入土壤的有机碳都聚集在土壤表层,植被类型差异所导致的根系生物量差异也在上层土壤表现得较为明显.本研究中,农田转变为草地后,表层(0~20 cm)SOC 储量提高了 5.3%,且二者之间均达到了显著水平,主要是由于黑土自然草原化草甸植被生长繁茂,地上和地下所积累的大量有机物质显著提高了土壤 SOC 含量,因而其 SOC 储量增加明显.SOC 储量的高低由 SOC 含量及容重所决定.尽管裸地表层 SOC 含量明显低于其他利用方式,但由于裸地常年缺少植被,雨水的冲击导致表层土壤紧实度增加,其容重明显大于其他利用方式,因而裸地表层 SOC 储量高于林地和农田,仅低于 SOC 含量最高的草地.

从整个 100 cm 或 200 cm 土体来看,农田 SOC 储量均显著低于其他 3 种利用方式.韩晓增等^[34]对北安市(与本研究所在的海伦市相邻,气候、地形条件基本一致)黑土的研究表明,自然草原化草甸植被下,100 cm 黑土中 SOC 储量为 $232.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,开垦为农田 2、8、15、30、50 和 100 年后,其值分别下降了 7.8%、12.9%、14.7%、17.2%、26.3% 和 23.7%.本文中黑土经过近 30 年的自然恢复,100 cm 土体 SOC 储量($228.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)与农田($194.7 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)相比,升高了 17.2%,与以上开垦 30 年 SOC 储量的下降值持平,这表明,黑土经过一定时间的植被恢复,其 SOC 储量会逐步提升到未开垦时的状态.在容重基本不变的情况下,SOC 储量提升的主要原因是进入到土壤中有有机碳的增加和 SOC 矿化速率的降低^[35],草地和林地 SOC 储量高于农田的原因包括以上二者,而裸地 SOC 储量高于农田的原因是其不受耕作措施干扰,SOC 矿化速率低于农田.方华军等^[16]估算,未来 20 年内黑土固碳潜力为 30.9 Tg C ,

平均每年 1.55 Tg C ; 本文中黑土在无植被输入、无耕作措施干扰和水土流失的条件下, 30 年间 SOC 处理与农田相比提高了 $32.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均每年 $1.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 说明农田黑土具有较高的固碳潜力。

黑土由自然植被转变为农田后 SOC 会迅速下降到一定水平得到了诸多研究的证实。然而, 目前黑土区未开垦的自然土壤已经寥寥无几, 我们应更加关注未来利用方式的改变会对以农田为主要利用方式的黑土 SOC 分布及储量产生何种影响。在 2013 年 6 月土壤剖面采集过程中, 我们发现林地土壤温度与其他利用方式存在明显差异, 其 $140 \sim 200 \text{ cm}$ 土层处于冻结状态, 这势必会对剖面中有机碳的周转产生影响, 但由于缺乏温度数据, 未能对土壤有机碳与温度的相关性进行分析, 也未对凋落物和根系生物量进行调查分析, 因此难以全面评价不同土地利用方式下各影响因子与 SOC 库之间的关系。今后可利用同一地理位置下的黑土, 研究不同植被类型对 SOC 动态的影响机制, 包括不同植被类型对土壤性质及气候因子的影响、不同植被类型凋落物的数量和性质及其年际变化动态与 SOC 的关系、根系分布与 SOC 的关系。

4 结 论

对黑土不同土地利用方式下土壤有机碳的剖面分布研究结果表明, 农田、草地、林地和裸地剖面 SOC 含量存在着一定差异。经过上百年的耕作, 土壤有机碳含量降至一定水平后, 黑土植被恢复(草地)能有效提高剖面中 $0 \sim 60 \text{ cm}$ 土层有机碳含量。在传统的耕作措施下, 农田黑土剖面中 $10 \sim 120 \text{ cm}$ 各层土壤有机碳含量均低于草地、林地和裸地, 且无论是 100 cm 还是 200 cm 土体, 农田土壤有机碳储量均显著低于其他 3 种利用方式, 一方面说明以农田为主要利用方式的黑土不利于有机碳的固定, 另一方面也反映了农田黑土具有较大的固碳潜力。有大量凋落物归还到土壤中的草地以及退耕休闲的裸地, 其有机碳储量均显著高于耕地, 这间接反映了有机物料的投入和免耕对黑土有机碳提升的积极作用, 因此, 应从以上两方面入手, 寻求一种能够保护黑土肥力、实现其固碳潜力的耕作施肥制度, 达到粮食生产与土壤生态系统和环境间的平衡。

参考文献

[1] Dou S (窦 森). Soil Organic Matter. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)

[2] Batjes NH. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, **47**: 151–163

[3] Poeplau C, Don A. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. *Geoderma*, 2013, **192**: 189–201

[4] Davidson EA, Ackerman IL. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, 1993, **20**: 161–193

[5] McLauchlan K. The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: A review. *Ecosystems*, 2006, **9**: 1364–1382

[6] Knops JM, Tilman D. Dynamics of soil nitrogen and carbon accumulation for 61 years after agricultural abandonment. *Ecology*, 2000, **81**: 88–98

[7] Laganier J, Angers DA, Pare D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 439–453

[8] Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, et al. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 2007, **137**: 253–268

[9] Murty D, Kirschbaum MU, Mcmurtrie RE, et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 105–123

[10] Gajä B. Physical properties and organic matter of fluvisols under forest, grassland, and 100 years of conventional tillage. *Geoderma*, 2013, **200**: 114–119

[11] Han X-Z (韩晓增), Li N (李 娜). Key Ecological Processes and Regulations of Farmland in Northeast China. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2011 (in Chinese)

[12] Boyer JN, Groffman PM. Bioavailability of water extractable organic carbon fractions in forest and agricultural soil profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**: 783–790

[13] Lu R-K (鲁如坤). Analytical Methods for Soil and Agro-chemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)

[14] Lambin EF, Turner BL, Geist HJ, et al. The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 2001, **11**: 261–269

[15] Jobbágy EG, Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, **10**: 423–436

[16] Fang H-J (方华军), Yang X-M (杨学明), Zhang X-P (张晓平), et al. Organic carbon stock of black soils in Northeast China and its contribution to atmospheric CO_2 . *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2003, **17**(3): 9–12 (in Chinese)

[17] Yang X-M (杨学明), Zhang X-P (张晓平), Fang H-J (方华军), et al. Changes in organic matter and total nitrogen of black soils in Jilin Province over the past two decades. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2004, **24**(6): 710–714 (in Chinese)

[18] Zhao L-J (赵丽娟), Han X-Z (韩晓增), Wang S-Y

- (王守宇), *et al.* Changes of crop yield and soil fertility under long-term fertilization and nutrients-recycling and reutilization on a black soil. IV. Soil organic carbon and its fractions. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(5): 817–821 (in Chinese)
- [19] Liang A-Z (梁爱珍), Zhang X-P (张晓平), Yang X-M (杨学明), *et al.* Distribution of soil organic carbon and its loss in black soils in northeast China. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2008, **39**(3): 533–538 (in Chinese)
- [20] Yang J-C (杨景成), Han X-G (韩兴国), Huang J-H (黄建辉), *et al.* Effects of land use change on carbon storage in terrestrial ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(8): 1385–1390 (in Chinese)
- [21] Six J, Paustian K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **68**: A4–A9
- [22] Wang S-Q (王绍强), Liu J-Y (刘纪远). Research status quo of impact factors of soil carbon storage. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 2002, **17**(4): 528–534 (in Chinese)
- [23] Zhang X-Y (张兴义), Zhang S-L (张少良), Liu S (刘爽), *et al.* Study on technique to fleetly upgrade of productivity of serious eroded black farmland. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2010, **17**(4): 1–5 (in Chinese)
- [24] Del Galdo I, Six J, Peressotti A, *et al.* Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 1204–1213
- [25] Paul KI, Polglase PJ, Nyakuengama JG, *et al.* Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002, **168**: 241–257
- [26] Ross DJ, Tate KR, Scott NA, *et al.* Land-use change: Effects on soil carbon, nitrogen and phosphorus pools and fluxes in three adjacent ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**: 803–813
- [27] Guo LB, Gifford RM. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, **8**: 345–360
- [28] Li Z-P (李忠佩), Wu X-C (吴晓晨), Chen B-Y (陈碧云). Changes in transformation of soil organic carbon and functional diversity of soil microbial community under different land use patterns. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(8): 1712–1721 (in Chinese)
- [29] Wu X-G (武小钢), Guo J-P (郭晋平), Yang X-Y (杨秀云), *et al.* Soil organic carbon storage and profile inventory in the different vegetation types of Luya Mountain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(11): 3009–3019 (in Chinese)
- [30] Salome C, Nunan N, Pouteau V, *et al.* Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 416–426
- [31] Zhou L (周莉), Li B-G (李保国), Zhou G-S (周广胜). Advances in controlling factors of soil organic carbon. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 2005, **20**(1): 99–105 (in Chinese)
- [32] Chen Q-Q (陈庆强), Shen C-D (沈承德), Sun Y-M (孙彦敏), *et al.* Mechanism of distribution of soil organic matter with depth due to evolution of soil profiles at the Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2005, **42**(1): 1–8 (in Chinese)
- [33] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2011, **17**: 1658–1670
- [34] Han X-Z (韩晓增), Wang S-Y (王守宇), Song C-Y (宋春雨), *et al.* Effect of land use cover change on ecological environment in black soil region. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2005, **25**(2): 203–208 (in Chinese)
- [35] Jiang Y (姜勇), Zhang Y-G (张玉革), Liang W-J (梁文举), *et al.* Profile distribution and storage of soil organic carbon in an aquic brown soil as affected by land use. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(3): 544–550 (in Chinese)

作者简介 郝翔翔,男,1984年生,博士研究生.主要从事土壤有机质研究. E-mail: haoxx@neigaehrb.ac.cn

责任编辑 杨弘
